

Un diagrama de fase para analizar la evolución de emisiones acústicas y electromagnéticas generadas durante procesos de fractura en rocas.

Jorge Clavijo¹, Sandra Sánchez², Honquiang Wang³

¹Escuela Colombiana de Ingeniería, Bogotá, Colombia ² Universidad de Nariño, Pasto, Colombia ³China Earthquake Administration, Beijing, China

contacto: jorge.clavijo@escuelaing.edu.co

Resumen

Los procesos de fractura en rocas (materiales frágiles) están gobernados por la generación y coalescencia de microfracturas. Durante su crecimiento cada microfractura genera emisiones acústicas (EA) o electromagnéticas (EEM) que permiten su detección. La energía (E) de estas emisiones abarca varios órdenes de magnitud y su representación está basada en la distribución estadística de los eventos acumulados, la cual obedece leyes similares a la relación de Gutenberg-Richter de terremotos y resalta el carácter crítico del proceso. Sin embargo, este análisis no permite distinguir la clase de fractura (tipos I, II o III) asociada con cada emisión, lo cual es fundamental para establecer los procesos presentes en el interior de la roca.

En este trabajo proponemos representar la información estadística de la energía combinándola con la del tiempo de vida de la emisión (τ) en un diagrama de fase E vs τ . En este diagrama las EA asociadas con fracturas de tensión pura (tipo I) o de cizalla pura (tipos II y III) quedan representadas por curvas claramente distinguibles mientras que el resto de EA quedan contenidas en la región comprendida entre estas curvas. La densidad de eventos sobre este espacio permite determinar los procesos dominantes en diferentes instantes de tiempo y además, ayuda a estudiar posibles relaciones entre EA y EEM de manera directa. Para evaluar esta propuesta usamos datos de EA y EEM obtenidos por nosotros durante procesos de carga en muestras de granito. Los resultados obtenidos pueden contribuir a determinar la relación entre EA y EEM, tema de debate en el estudio de precursores de fracturas y terremotos.

Aspectos Introductorios

- En materiales frágiles como las rocas el proceso de fractura bajo la aplicación de esfuerzos no está gobernado por la creación y crecimiento de una sola fractura sino por la generación y unión de microfracturas que aparecen gradual y aleatoriamente en distintos puntos de la muestra [1].
- La presencia de microfracturas se puede determinar a través de la generación de emisiones acústicas y electromagnéticas.
- El seguimiento de las EA y las EEM puede ser usado para obtener información acerca del avance del proceso de fracturamiento y la proximidad a la ruptura definitiva del material. Esto es de crucial importancia en un rango amplio de aplicaciones que va desde el monitoreo de minas subterráneas hasta el análisis de estabilidad en estructuras de concreto reforzado.
- El seguimiento de las EEM y las EA se puede realizar mediante la distribución energética de eventos acumulados, $N(E)$, la cual mide el número de eventos N con energía superior a E , ó mediante el análisis paramétrico el cual se enfoca en algunos parámetros de las emisiones individuales. Sin embargo, estos acercamientos no permiten una diferenciación entre las emisiones originadas por fracturas de tipo tensión o de tipo corte.
- En este trabajo proponemos una representación alternativa de las EA en un diagrama que combina la energía de las emisiones (E) y su duración o tiempo de vida (τ). En este acercamiento E y τ se consideran como variables independientes; por esa razón el diagrama E vs τ se puede ver, al menos *cualitativamente*, como un *diagrama de fase* similar a los usados en muchos sistemas físicos para representar la dinámica del sistema.

Montaje Experimental

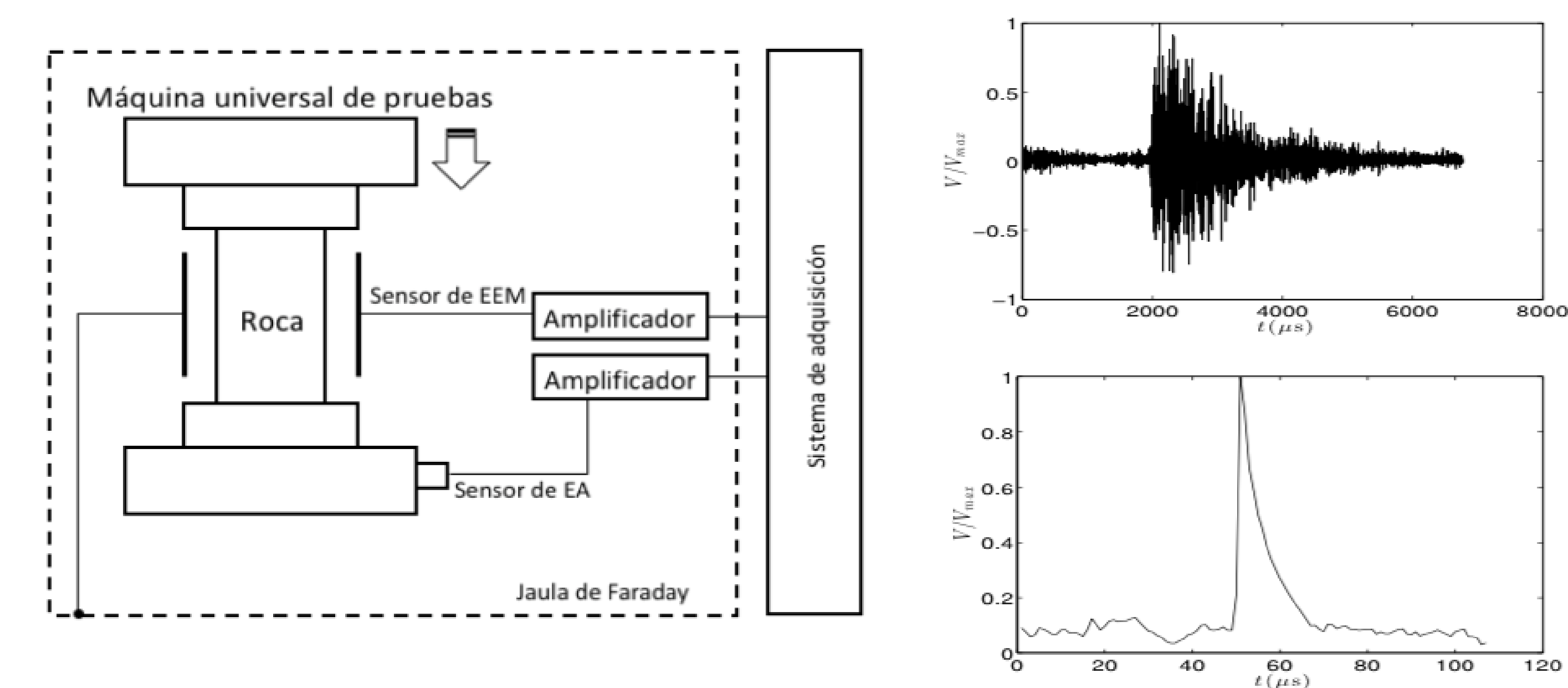


Figura 1: Izquierda: Esquema del montaje experimental. Superior derecha: Ejemplo de emisión acústica. Inferior derecha: Ejemplo de emisión electromagnética.

El esquema del montaje experimental se muestra en la Figura 1(izquierda). Se usaron como muestras cilindros de granito con composición mineralógica de: cuarzo 30 %, plagioclasa 30 %, feldespato 15 %, biotita 15 % y hornblenda 8 %. Como sensor acústico se usó un transductor piezoeléctrico instalado en la base del soporte universal. Las emisiones electromagnéticas fueron detectadas con un sensor capacitivo cuyas láminas se ubicaron a 5.0 mm de las superficies de la roca; este sensor permite detectar la mayoría de las EEM independientemente de su patrón de radiación. Tanto las EA como las EEM fueron amplificadas con un amplificador de bajo ruido que multiplicó su amplitud por un factor 10^2 y fueron almacenadas en un sistema de adquisición de datos multicanal con una frecuencia de muestreo

de 2.0 MHz. Todo el montaje fue introducido en una jaula de Faraday para reducir el ruido electromagnético presente en el laboratorio. El esfuerzo externo se aplicó gradualmente con una prensa hidráulica a una tasa aproximada de 16 kPa/s lo que llevó a la ruptura definitiva de la muestra en un tiempo aproximado de 360 s. En la Figura 1 (derecha) se muestran ejemplos de las EA y EEM

Resultados

Tomando los tiempos de inicio y fin de las emisiones como t_i y t_f , la energía de las emisiones se calcula como $E \sim \int_{t_i}^{t_f} v^2 dt$ y el tiempo de vida como $\tau = t_f - t_i$, la construcción del diagrama E vs τ para las EA y las EEM se puede apreciar en la Figura 2.

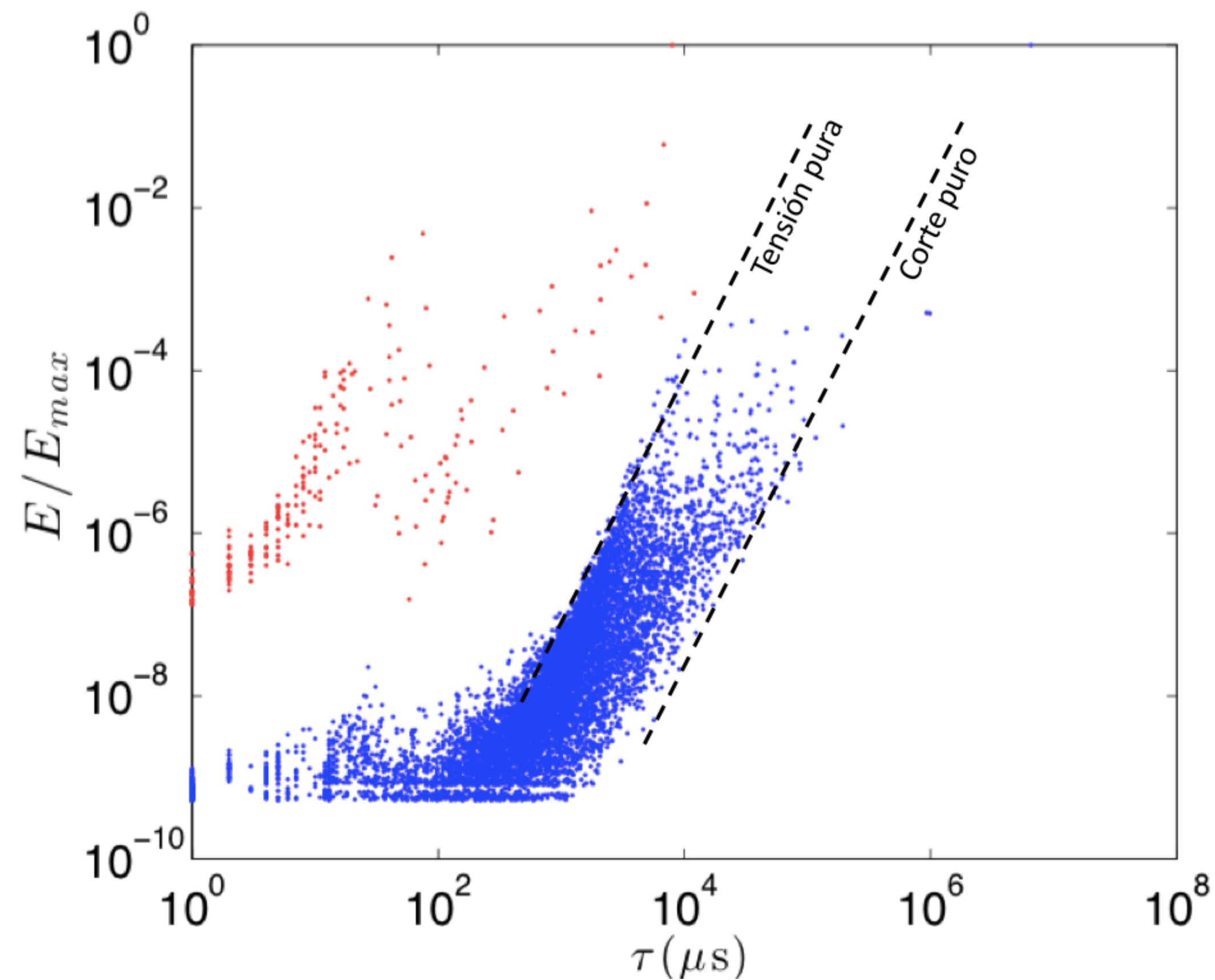


Figura 2: Diagrama de fase para las emisiones acústicas (azul) y electromagnéticas (rojo)

Interpretación

Las emisiones acústicas claramente quedan acotadas entre dos rectas bien definidas. Para explicar esto proponemos que la energía de las EA escala con la longitud de la fractura D de la forma:

$$E \sim D^n, \quad (1)$$

donde n es un exponente positivo. Si se asume que la fractura se propaga a velocidad constante ($D \sim \tau$) entonces la ecuación (1) se convierte en:

$$E \sim v^n \tau^n, \quad (2)$$

donde v es la velocidad de propagación de la fractura. Debido a que las fracturas de tipo corte se propagan a una velocidad menor que las de tipo tensión, la ecuación (2), en escala *log-log*, predice la existencia de dos rectas sobre las cuales quedarán representadas las emisiones asociadas con fracturas puras de tensión (recta superior) y de corte (recta inferior). Es claro a partir de la Figura 2 que las emisiones electromagnéticas no siguen el mismo comportamiento.

A partir de la pendiente de estas rectas se encuentra que:

$$n \approx 3, \quad (3)$$

lo que implica que $E \sim D^3$ algo similar a lo encontrado en el análisis estadístico de terremotos [2, 3], aunque ahí la interpretación está basada en las leyes empíricas de escala obtenidas a partir de los catálogos mundiales de sismos.

Conclusiones

1. En el diagrama de fase E vs τ la mayoría de las EA quedan comprendidas entre dos funciones que se pueden asociar con comportamientos puros de corte y de tensión.
2. Los diagramas de fase para las EA y las EEM muestran claras diferencias, esto lleva a pensar que sus mecanismos físicos de generación son diferentes.
3. A partir de la construcción del diagrama de fase para las EA encontramos que $E \sim D^3$, la cual es idéntica a la reportada para sismos a nivel mundial, aunque la interpretación sugerida por nosotros es diferente.

Referencias

- [1] A Sornette and D Sornette. Earthquake rupture as a critical point: Consequences for telluric precursors. *Tectonophysics*, 179(3):327–334, 1990.
- [2] Seth Stein and Michael Wyssession. *An introduction to seismology, earthquakes, and earth structure*. John Wiley & Sons, 2009.
- [3] R Silva, GS França, CS Vilar, and JS Alcaniz. Nonextensive models for earthquakes. *Physical Review E*, 73(2):026102, 2006.